نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۹، ص. ۱۱۸۸-۱۱۷۵

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 5, Nov.-Dec. 2020, p. 1175-1188

مقاله علمی-پژوهشی

آشکارسازی چگونگی واکنش خطی-غیرخطی و ترکیبی تبخیر پتانسیل به متغیرهای هواشناختی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز)

حمید میرهاشمی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

چکیده

تبخیر پتانسیل به‌عنوان یکی از مهمترین مؤلفه‌های چرخه آب به شمار می‌رود که برآیند اندرکنش چندین متغیر هواشناختی است. در این پژوهش به‌منظور آشکارسازی روابط خطی و غیرخطی و چگونگی تأثیر متغیرهای هواشناختی بر مقادیر تبخیر پتانسیل ایستگاه سینوپتیک تبریز از مدل‌های جمعی تعمیم‌یافته (GAM) و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) استفاده شد. به این ترتیب، مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناختی شامل دمای هوا، فشار هوا، نم‌نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان متغیرهای شناختی و مقدار تبخیر از تشت تبخیر به‌عنوان متغیر پاسخ در این مدل‌ها در نظرگرفته شدند. همچنین برای تعیین گره و گرادیان‌های واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناختی از ترکیب الگوریتم سیمپلکس و مدل تطبیقی مارس اسپلاین تحت سه سناریوی آب و هوایی S-1، S-2 و S-3 که بر پایه داده‌های ایستگاه تبریز تعریف شده بودند استفاده شد. نتایج حاصل از دو مدل GAM و GLM نشان داد که نم‌نسبی در ترکیب با سایر متغیرهای هواشناختی از تأثیر خطی و غیرخطی معناداری بر گرادیان تبخیر پتانسیل برخوردار نیست. چنانکه با کنترل دمای هوا، نقش نم‌نسبی در گرادیان تبخیر ناچیز و قابل چشم‌پوشی شد. در این خصوص بهترین ترکیب متغیرهای هواشناختی در مدل‌های GAM و GLM براساس آماره AIC به‌ترتیب به مقدار ۸۴- و ۶۲- و خطای محاسباتی ۰/۷۱ و ۰/۷۶ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی مؤلفه‌های هموارساز اسپلاین مدل GAM و ترکیب الگوریتم سیمپلکس ـ مدل تطبیقی مارس اسپلاین نشان داد که واکنش انفرادی و ترکیبی تبخیر به متغیرهای هواشناختی تنها منوط به یک سطح نیست بلکه واکنش تبخیر از گرادیان‌های متفاوتی در مقابل تغییرات این متغیرها برخوردار است. چنانکه حساسیت و واکنش تبخیر نسبت به هر واحد تغییر از این متغیرها به مقدار مطلق آن متغیر در ترکیب با سایر متغیرها بستگی داشت. یعنی اثر هریک از متغیرهای هواشناختی بر مقدار تبخیر تا حد زیادی منوط به رابطه‌ای است که این متغیر با سایر متغیرهای هواشناختی دارند، در صورتی‌که چنین موضوعی برای دمای هوا چندان صدق نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم سیمپلکس، تبخیر، غیرخطی، سناریو، مدل ترکیبی، مؤلفه هموارساز

مقدمه

از نظر هیدرولوژی تبخیر به مجموعه پدیده‌هائی گفته می‌شود که آب را صرفاً از راه یک فرایند فیزیکی به بخار تبدیل می‌کنند. عواملی که میزان تبخیر را مشروط می‌سازند بر حسب اینکه وابسته به هوای مجاور یا سطح تبخیرکننده باشند به دو دسته کاملاً متمایز تقسیم شده‌اند. عواملی که مربوط به هوای مجاور سطح تبخیر بوده و به‌واقع محرک آن هستند به‌عنوان عوامل هواشناختی و یا عوامل قدرت و یا توان تبخیر جو نامیده می‌شوند (۱۵ و ۱۶). بنابراین، پتانسیل تبخیر جو، برآیند اثر ترکیبی چندین متغیر هواشناختی است (۲) که مهمترین آنها عبارتند از دمای هوا، نم‌نسبی (یا اختلاف بخار برای اشباع هوا)، سرعت باد، ساعات آفتابی و فشار هوا (۱۱) (۱۸ و ۲۱). چنانکه مقدار تبخیر پتانسیل، وابسته به چگونگی اندرکنش این متغیرها در هر منطقه آب و هوایی است. واکنش کلی تبخیر پتانسیل به هریک از این متغیرها، بستگی به اهمیتی دارد که آن متغیر در محیط مورد بررسی برعهده دارد. به‌عنوان نمونه، در مکان‌های بادخیز، اهمیت سرعت باد در میزان تبخیر پتانسیل نسبت به مکان‌های با هوای آرام، افزایش پیدا می‌کند. با تغییر هر یک از این متغیرهای هواشناختی، ضمن اینکه مابقی متغیرها به تغییر یادشده واکنش نشان می‌دهند، اثر کلی این تغییر و واکنش‌ها، در مقدار تبخیر پتانسیل نمود پیدا می‌کند

۱- استادیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا دانشگاه لرستان
(*- نویسنده مسئول: Email: mirhashemi.h@lu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v34i5.82703

(۹). بنابراین بدیهی است که واکنش تبخیر پتانسیل نسبت به متغیرهای هواشناختی با توجه به تغییرات مکانی و زمانی که این متغیرها دارند، از ماهیت پیچیده‌ای برخوردار باشد. از سویی به‌سبب رابطه تنگاتنگی که تبخیر پتانسیل به طور مستقیم با بسیاری از جنبه‌های حیات بشر دارد، پژوهش‌های فراوانی در مورد پیش‌بینی و ارتباط متغیرهای هواشناختی با این متغیر هیدرو ـ متئورولوژیکی با استفاده از روش‌های آماری، تجربی، آزمایشگاهی، هوش مصنوعی انجام گرفته که حجم و تاریخچه این مطالعه‌ها نشان از اهمیت و توجه جوامع علمی از دیرباز به پدیده تبخیر و مؤلفه‌های مرتبط با آن دارد.

دهقانی و همکاران (۳) با بهره‌گیری از متغیرهای هواشناختی شامل دمای هوا، نم‌نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان ورودی و مقدار تبخیر حاصل از تشت به‌عنوان خروجی مدل شبکه عصبی، تأثیر متغیرهای هواشناختی را در برآورد تبخیر و حساسیت تبخیر را نسبت به این متغیرها ارزیابی کردند. براساس نتایج آنها، سرعت باد و دمای هوا به ترتیب به‌عنوان کم‌اثرترین و موثرترین متغیر در تخمین تبخیر روزانه به شمار می‌روند. رحیمی خوب و محمودی (۱۴) به‌منظور برآورد تبخیر ـ تعرق بر پایه‌ی حداقل داده‌های هواشناختی در حوضه امامه از چهار نوع شبکه عصبی استفاده کردند. ایشان، متغیرهای دمای بیشینه و دمای کمینه، نم‌نسبی و سرعت باد را به‌عنوان حداقل داده‌های هواشناختی مورد نیاز برای برآورد تبخیر ـ تعرق معرفی کردند. سلطانی و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به مقایسه کارائی دو روش غیرخطی خودرگرسیونی با ورودی برون‌زا (NN-ARX) و سیستم استنتاج فازی ـ عصبی تطبیقی (ANFIS) در مدل‌سازی تبخیر سه اقلیم خشک و گرم، خشک و گرم ساحلی و نیمه خشک و معتدل گرم پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از تکنیک گاماتست مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، بهترین ترکیب ورودی دو مدل غیرخطی یادشده را از بین ۵ متغیر اقلیمی شامل دمای هوا، نم‌نسبی، سرعت باد، کمبود فشار بخار اشباع و ساعات آفتابی را برای هر ایستگاه مشخص کردند. برمبنای نتایج گزارش شده، کارایی هر دو مدل در تخمین مقدار تبخیر اقلیم خشک و گرم بیشتر از دو اقلیم دیگر بوده و به‌طورکلی مدل ANFIS با خطای کمتری نسبت به مدل NN-ARX، مقدار تبخیر روزانه را برآورد می‌کند. ولیزاده کامران (۲۰) با محاسبه تبخیر–تعرق پتانسیل به روش استنفزا در آذربایجان شرقی و ترسیم نقشه پدیده یادشده برای روز ۱۱ خردادماه به این نتیجه رسید که ارتفاع و جهت شیب به‌عنوان مهمترین عامل در ایجاد نوسان مکانی تبخیر–تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی محسوب می‌شوند. خورشیددوست و همکاران (۱۱) با مدل‌سازی و ارزیابی تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل هواشناسی بر تبخیر پتانسیل دوره گرم شهرستان تبریز با استفاده از معادلات ساختاری نشان دادند که چه مقدار از تأثیر هر یک از متغیرهای هواشناسی بر تبخیر پتانسیل ناشی از متغیر رابطی است که چه بسا با کنترل و یا ثابت نگهداشتن آن متغیر واسط، می‌توان به میزان تأثیرگذاری واقعی هر متغیر بر تبخیر پتانسیل آگاهی پیدا کرد. عیسی‌زاده و همکاران (۸) با ۱۰ ترکیب گوناگون از ۷ متغیر هواشناختی شامل دمای هوا، دمای شبنم، نم‌نسبی، فشار سطح ایستگاه، سرعت باد، بارش و ساعات آفتابی به بررسی کارایی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان در برآورد مقدار تبخیر ایستگاه سینوپتیک تبریز و مراغه پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد که در حالت کلی هر دو مدل از کارائی مناسبی در تخمین تبخیر هر دو ایستگاه برخورداند. همچنین نتایج حاصل از برازش تک ورودی متغیرها نشان داد که دمای هوا و ساعات آفتابی بیشترین تأثیر را در برآورد تبخیر دارند. نتایج حاصل از برازش انفرادی هریک از این ۷ متغیر نیز نشان داد که استفاده از دمای هوا و ساعات آفتابی در هر دو مدل، کم‌ترین خطا را نسبت به سایر متغیرها در برآورد تبخیر به دنبال دارند. ژو و سینگ[1] (۲۲) وابستگی تبخیر به پنج متغیر هواشناختی شامل تابش خورشید، نم‌نسبی، دمای هوا، سرعت باد و اختلاف فشار بخار را در مقیاس‌های زمانی ساعتی، روزانه، ۱۰ روز و ماهانه بررسی کردند. آنها دریافتند که تأثیر این متغیرها بر تبخیر با تغییر مقیاس زمانی، تغییر پیدا می‌کند. دمای هوا و نم‌نسبی در مقیاس‌های زمانی کوتاه و اختلاف فشار بخار در تمامی مقیاس‌های زمانی از همبستگی بسیار بالایی با تبخیر پتانسیل برخوردار بودند. سرعت باد در مقایسه با سایر متغیرها، دارای کمترین همبستگی با تبخیر بود. رن[2] و همکارن (۱۷) با استفاده از رگرسیون خطی و آزمون من ـ کندال مشخص کردند که دمای هوا و نم‌نسبی در تمامی مقیاس‌های زمانی، به‌عنوان مهمترین متغیرهای موثر بر تبخیر پتانسیل در حوضه رودخانه هایلار (ایستگاه واقع در کشور چین) به شمار می‌روند. درصورتی که با تغییر مقیاس زمانی، تأثیر سرعت باد و ساعات آفتابی بر تبخیر پتانسیل، غیرمعنادار می‌شود. همچنین نتایج حاصل از آزمون من–کندال، روند افزایشی را برای تبخیر پتانسیل و دمای هوا و روند کاهشی را برای سرعت باد، ساعات آفتابی و نم‌نسبی، نشان می‌دهد. شی[3] و همکاران (۱۹) بامطالعه نوسانات فضایی و زمانی تبخیر پتانسیل و عوامل محرک آن با استفاده از اطلاعات ثبت شده در ۲۲ ایستگاه هواشناسی در تبت دریافتند که تبخیر پتانسیل طی دوره آماری ۱۹۶۱–۲۰۰۱ دستخوش کاهش معناداری شده است. همچنین ایشان با ارزیابی متغیرهای هواشناختی مؤثر در تبخیر پتانسیل، اختلاف فشار بخار اشباع را به‌عنوان مهمترین عامل در تعیین تبخیر پتانسیل نشان دادند. یان[4] و همکاران (۲۳) به منظور شناسایی الگوهای فضای و زمانی

1- Xu and Singh
2- Ren
3- Shi
4- Yan

رابطه متغیرهای هواشناختی با تبخیر پتانسیل در حوضه رودخانه واقع در چین، ابتدا با کاربرد روش خوشه‌بندی k-means و براساس داده‌های ۴۴ ایستگاه‌ها هواشناختی، این حوضه را به ۶ زیرحوضه تقسیم کردند. در ادامه با کاربرد آزمون همبستگی اسپرمن نشان دادند که اگرچه در مجموع کل حوضه، مؤلفه‌های میانگین، کمینه و بیشینه دمای هوا، نم‌نسبی، سرعت باد، بارش و ساعات آفتابی دارای رابطه معنادار با تبخیر پتانسیل هستند اما نقش و مقدار تأثیر آنها بر تبخیر پتانسیل در هرکدام از زیر حوضه‌ها متفاوت است. مانوج و مرگن[1] (۵) با ارزیابی وابستگی تبخیر روزانه به متغیرهای هواشناختی در منطقه جانگده هندوستان دریافتند که تابش خورشید، بیشینه دما و اختلاف فشار بخار به طور معناداری بر تبخیر پتانسیل موثرند. در صورتی که ساعات آفتابی و سرعت باد از کمترین همبستگی با تبخیر پتانسیل برخوردار بودند. چنانکه این دو متغیر را به‌عنوان متغیرهای بدون تأثیر بر تبخیر پتانسیل به حساب آوردند. همچنین آنها رابطه معکوسی بین نم‌نسبی و تبخیر پتانسیل تشخیص دادند.

به طورکلی تبخیر پتانسیل از یک سو به‌عنوان مهمترین عامل در ترازمندی انرژی در مقیاس محلی، نقش تعیین کننده‌ای در منابع آب قابل‌دسترس در مقیاس یادشده ایفا می‌کند (۱۷) و از سوی دیگر، این پدیده عمدتاً تحت تأثیر متغیرهای هواشناختی قرار دارد (۱۰)؛ بنابراین، لازم است تا گستره‌های متفاوتی که در آن، متغیرهای هواشناختی به صورت خطی و غیرخطی، تبخیر پتانسیل را دستخوش تغییر می‌کنند، بررسی شوند تا ضمن روشن شدن زوایای تبخیر پتانسیل بتوان راهبردهای کشاورزی ـ مدیریتی را به صورت بهینه‌تری مبتنی بر پتانسیل‌های موجود محیطی استوار ساخت. بنابراین مهمترین هدف این مطالعه، بررسی چگونگی واکنش تبخیر پتانسیل ماه‌های گرم ـ نسبتاً گرم سال ایستگاه سینوپتیک شهرستان تبریز در مقابل گرادیان‌های ترکیبی و انفرادی متغیرهای هواشناختی ایستگاه یادشده و کشف روابط خطی و غیرخطی که این متغیرها به‌صورت ترکیبی با این پدیده دارند است تا براین اساس بتوان به درک مناسبی از تفاوت‌های موجود در واکنش تبخیر برحسب مقادیر متفاوت این متغیرهای هواشناختی در طی ماه‌های گرم–نسبتاً گرم سال دست یافت.

مواد و روش‌ها

از آنجایی که رهیافت این مطالعه مبتنی بر مدل‌سازی و ارزیابی تأثیر متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل شهر تبریز است، ابتدا داده‌های ماهانه متغیرهای هواشناختی شامل دمای هوا، فشار هوا در سطح دریا، سرعت باد، نم‌نسبی و ساعات آفتابی که در بررسی منابع انجام شده نقش مهمی در گرایش تبخیر پتانسیل دارند به‌عنوان متغیرهای مستقل یا تبیینی در نظر گرفته شدند. با احتساب به اینکه میزان تبخیر اندازه‌گیری‌شده توسط تشت یا حوضه‌های آزمایشی و سفره‌های آزاد آب کم‌عمق نیز می‌توانند با وجود اینرسی حرارتی کم و بیش زیاد این وسایل، تا اندازه‌ای معرف پتانسیل تبخیر جو باشند (۱۶)، داده‌های ماهانه تبخیر از تشت ایستگاه سینوپتیک تبریز نیز به‌عنوان متغیر پاسخ یا وابسته در نظر گرفته شد. شایان توجه است که داده‌های هواشناختی و داده‌های تبخیر با پوشش زمانی ۱۹۹۲–۲۰۱۱ مربوط به ماه‌های، آوریل، مه، ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر یعنی ماه‌های که مقدار تبخیر در ایستگاه تبریز ثبت شده‌اند است. زیرا در سایر ماه‌های سال که عمدتاً در فصل زمستان قرار دارند، مقدار تبخیر در این ایستگاه اندازه‌گیری نمی‌شود.

روش‌ها

اندرکنش و تأثیر متغیرهای هواشناختی و هیدرولوژیکی به‌صورت خطی و غیرخطی است. بنابراین در این مطالعه برای آگاهی از چگونگی رابطه و تأثیر انفرادی و ترکیبی متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل از چندین رویکرد که هرکدام قادر به کشف روابط خطی و غیرخطی هستند استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا از طریق مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM)[2]، مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)[3] به ترتیب رابطه غیرخطی و خطی متغیرهای هواشناسی با تبخیر پتانسیل شناسایی شد. در گام بعدی باکاربرد الگوریتم سیمپلکس بر مدل تبخیر کمانک تطبیقی مارس اسپلاین، سطوح گرادیان پاسخ تبخیر به متغیرهای هواشناختی به صورت انفرادی معین شدند. همچنین برای آگاهی از فرایند پاسخ خالص تبخیر به هرکدام از این متغیرها تحت شرایط متفاوت آب و هوایی، ابتدا سه وضعیت آب و هوایی مبتنی بر داده‌های ایستگاه سینوپتیک تبریز به‌صورت سه سناریو در قالب S-1، S-2 و S-3 تعریف شدند که سناریو اول (S-1) اشاره به شرایط نرمال، سناریو دوم (S-2) و سوم (S-3) به‌ترتیب به شرایطی مشابه با فصل بهار و تابستان آب و هوای ایستگاه سینوپتیک تبریز دارند. در ادامه با کنترل و ثابت نگه‌داشتن متغیرهای هواشناختی تحت این سه سناریو، و ترکیب الگوریتم سیمپلکس با مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین، گردایان خالص واکنش تبخیر به تغییرات متغیرهای هواشناختی ارزیابی شد.

1- Manoj and Mrugen

۲- Generalized Additive Model (GAM)

3- Generalized Linear Model (GLM)

مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (GLM) و جمعی تعمیم‌یافته (GAM)

مدل GLM یک مدل پارامتری بوده که بسط مدل‌های خطی است. در این مدل، فرمول ارائه می‌شود و رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته به وسیله پارامتر برآوردشده رگرسیون و فاصله‌های اطمینان سنجش می‌شود. مدل GLM بسط مدل‌های خطی را به صورت رابطه نشان ۱ می‌دهد.

$$g(\mu) = a + \sum \beta_j x_j \quad (1)$$

که g: تابع پیوند از خانواده نمایی است. از سویی، GAM یک مدل ناپارامتری بوده که بسط مدل‌های GLM است (۷). در این مدل‌ها برخلاف مدل‌های پارامتری که در آنها رابطهٔ بین متغیرهای مستقل و وابسته به وسیله فرمول ارائه می‌شود، اجازه داده می‌شود، داده‌ها شکل منحنی پاسخ را تعیین کنند. در این مدل‌ها، فرض بر این است که متغیر وابسته یا پاسخ، دارای توزیعی از خانواده نمایی با میانگین ($\mu=E(Y|X_1,\ldots, X_p)$) است که از طریق تابع پیوند (g) به متغیرهای مستقل (X_j) متصل می‌شود. به‌واقع، GAM فرم پارامتری متغیرهای مستقل را در مدل خطی به فرم ناپارامتری بسط می‌دهد. این مدل به صورت رابطه ۲ ارائه شده است.

$$g(\mu) = a + \sum_{j=1}^{p} f_j(X_j) \quad (2)$$

در این جا فرض می‌شود که f_jها توابعی نامعلوم و هموار و X_j متغیرهای مستقل هستند. به‌طور خاص، f_j از روی داده‌ها و با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته هموارساز نمودار پراکنش برآورد می‌شود. بنابراین چنانکه ذکر شد به‌جای اینکه منحنی پاسخ توسط اشکال موجود در کلاس پارامتری محدود شود، GAM اجازه می‌دهد که داده‌ها شکل منحنی پاسخ را تعیین کنند. تفاوت اساسی این مدل با مدل‌های پارامتری در این است که توابع خطی به وسیله توابع هموار نامعلوم جایگزین می‌شوند. دارا بودن هموارسازها یکی از مزایای مهم GAM است که آن را از سایر مدل‌ها متمایز می‌کند. این توابع، قابلیت جمع‌پذیری دارند، به این معنا که می‌توان در حالی که مدل به داده‌ها برازش شده است اثرات هر یک از متغیرهای پیشگو را به‌طور جداگانه آزمون کرد. به عبارتی، از آنجا که اثر هر متغیر، به صورت جداگانه بیان می‌شود، هرتابع می‌تواند برای آزمون نقش متغیرها در پیشگویی پاسخ به‌صورت جداگانه بررسی شود (۶). وجود هموارسازها در این مدل سبب توانایی آن در شناسایی روابط غیرخطی شده است (۴).

الگوریتم بهینه‌ساز سیمپلکس

الگوریتم سیمپلکس یک تکنیک جستجوی غیرگرادیان مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی است که برای کمینه کردن یک تابع دلخواه در یک تعداد دوره تکرار محدود بکار می‌رود. این الگوریتم برای هر تعداد از متغیرهای پیوسته کار می‌کند و هیچ پیش‌فرضی در مورد تابعی که باید بهینه شود به‌جزء اینکه پیوسته باشد ندارد. این الگوریتم در ابتدا با ارائه یک راه‌حل و آزمون بهینه‌سازی آن راه‌حل، شروع به کار می‌کند. اگر بهینه‌سازی رضایت‌بخش باشد، الگوریتم متوقف می‌شود در غیر این‌صورت، الگوریتم با ترسیم کردن یک سیمپلکس، نقطه بهینه دیگری را شناسایی می‌کند. آنگاه بهینه‌سازی این راه‌حل نیز آزمون می‌شود. به این ترتیب، تمامی پروژه تا زمانی که یک مجموعه مقادیر مستقل برای دستیابی مدل به متغیر وابسته دلخواه پیدا شوند انجام می‌گیرد (۱۳). به‌منظور ارزیابی صحت‌سنجی و گزینش بهترین ترکیب متغیرهای هواشناختی در هر یک از مدل‌ها GLM و GAM از معیار آکائیک (AIC) و ضریب همبستگی پیرسون (R) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

$$AIC = n \times \ln(RSS/n) + 2 \times K \quad (3)$$

در رابطه ۳، AIC معیار آکائیک، n: حجم داده‌ها، RSS: مجموع مربعات خطای مدل و K: تعداد پارامترها.

نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری متغیرهای مورداستفاده در این مطالعه در جدول شماره ۱ آورده شده است. مقایسه پراکنش سری زمانی این متغیرهای هواشناختی بر پایه ضریب پراکندگی نشان می‌دهد که پراکنش سالانه این متغیرها نسبتاً پایین است. دمای هوا با ضریب ۲۶ درصد و فشار هوا با ضریب ۰/۵ درصد به ترتیب از کمترین و بیشترین نظم حول میانگین بلندمدت برخوردارند. با این وجود، در مقیاس زمانی ماهانه، بعد از فشار هوا، کمترین ضریب پراکندگی به دمای هوا تعلق دارد که این فرایند، نظم رژیم دمای ماهانه را نسبت به رژیم دمای سالانه ایستگاه سینوپتیک تبریز نشان می‌دهد. به‌واقع هم‌گام با افزایش میانگین دمای ماهانه، پراکنش دما نیز کاهش پیدا می‌کند. سایر متغیرهای هواشناختی نیز از رژیم ماهانه منظم‌تری نسبت به رژیم سالانه برخوردارند. تبخیر پتانسیل با ضریب تغییرات ۳۵ درصد، رژیم نسبتاً نامنظمی را نشان می‌دهد. از سویی، گرایش و کجی سری زمانی تمامی متغیرها در مقیاس سالانه نشان از کجی اندک این متغیرها دارد. به طوری که اگر ضریب چولگی به‌عنوان مقیاسی از درجه تقارن شمرده شود، می‌توان ادعا کرد که سری زمانی تمامی متغیرها در مقیاس سالانه از درجه تقارن مناسبی برخوردارند.

برای آگاهی از تأثیر غیرخطی و خطی متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل، به ترتیب مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM) و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) اجرا شدند که نتایج حاصل از آن در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری متغیرهای هواشناختی و تبخیر پتانسیل ایستگاه سینوپتیک تبریز
Table 1- Statistical characteristics of meteorological variables and potential evaporation of Tabriz synoptic station

متغیر Variable	میانگین Average	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	چولگی Skew	ضریب تغییرات Coefficient of variability
دما (°C) Temperature (°C)	20.33	9.92	28.77	-0.27	26%
نم نسبی (%) Humid (%)	41.33	25.23	61.70	0.46	21%
فشار (mb) Pressure (mb)	1008.86	1000.76	1021.47	0.29	0%
سرعت باد (m/s) Wind (m/s)	3.81	2.07	5.62	0.08	20%
ساعات آفتابی (h) Sun (h)	9.59	5.58	12.43	-0.47	19%
تبخیر (mm) Evaporation (mm)	9.11	3.83	15.45	0.00	35%

به‌واقع اطلاعات مندرج در این جدول مبتنی بر انتخاب متغیرها با استفاده از بهترین زیرمجموعه و معیار AIC تا ۵ زیر مجموعه برای هر دو مدل GAM و GLM است. نتایج این محاسبه نشان می‌دهد که در کلیه ترکیب‌ها، مقدار خطای محاسباتی مدل GAM کمتر از مدل GLM است. همچنین با احتساب به معناداری متغیرها در هر مدل، ترکیب دما، فشار، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان بهترین زیرمجموعه از متغیرهای مؤثر در پراکنش تبخیر پتانسیل در هر دو مدل به حساب می‌آیند. از سویی، نم‌نسبی در این دو مدل خطی و غیرخطی، در ترکیب با سایر متغیرها، رابطه معناداری با تبخیر پتانسیل نشان نمی‌دهد. در ادامه، برای نیل به اهداف مطالعه، ابتدا مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM) با توزیع گاما و تابع پیوند همانی با ترکیب متغیرهای دمای هوا، فشار هوا، نم‌نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌عنوان متغیرهای مستقل در مقابل تبخیر پتانسیل به عنوان متغیر پاسخ به‌صورت ترکیبی اجرا شد (جدول ۳). درجه‌های آزادی بیشتر و مساوی ۲ در این جدول نشان از تأثیر غیرخطی متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل دارند.

برحسب مقادیر درجه آزادی و مقدار ضریب معناداری (P-value) حاصل از مدل مشخص می‌شود که از نظر آماری، تمامی متغیرهای هواشناختی به جزء نم‌نسبی، از رابطه غیرخطی معناداری با تبخیر پتانسیل برخوردارند. این مهم نشان می‌دهد که در صورت حذف اثر سایر متغیرهای هواشناختی، نم‌نسبی قادر نیست به طور معناداری، تبخیر پتانسیل را متحمل تغییر کند. بنابراین، با حذف متغیر نم‌نسبی از مجموع متغیرهای هواشناختی، فرایند مدل‌سازی تبخیر پتانسیل با استفاده از مدل GAM پیاده‌سازی شد. میزان خطای محاسباتی و ضریب همبستگی چندگانه خروجی از این مدل به ترتیب به مقدار ۰/۷۱ میلی‌متر و ۰/۹۷ بدست آمدند که این مقادیر نشان از عملکرد مناسب مدل دارد.

جدول ۲- نتایج آماری گزینش بهترین زیرمجموعه معنادار از متغیرهای هواشناختی در مدل GLM و GAM
Table 2- Statistical results of best subset of meteorological variables selected in GLM and GAM model

گام Step	متغیر Variable	مدل Model GLM AIC	 GLM R	 GLM RMSE	 GAM AIC	 GAM R	 GAM RMSE
1	دما، فشار، ساعات آفتابی، سرعت باد، نم‌نسبی Temperature, Pressure, Sun, Wind ,Humid	-51	0.97	0.794	-84	0.976	0.69
2	دما، فشار، ساعات آفتابی، سرعت باد Temperature, Pressure, Sun, Wind	-62	0.972	0.76	-86	0.976	0.71
3	دما، فشار، سرعت باد Temperature, Pressure, Wind	-39	0.966	0.843	-54	0.97	0.8
4	دما، فشار، سرعت باد، نم‌نسبی Temperature, Pressure, Wind, Humid	-37	0.966	0.843	-56	0.97	0.78
5	دما، ساعات آفتابی، سرعت باد، نم‌نسبی Temperature Sun, Wind, Humid	-30	0.965	0.868	-65	0.97	0.76

جدول ۳- نتایج حاصل از اجرای مدل GAM برروی متغیرهای هواشناختی در مقابل تبخیر

Table 3- Performance results for GAM model with meteorological variables vs evaporation

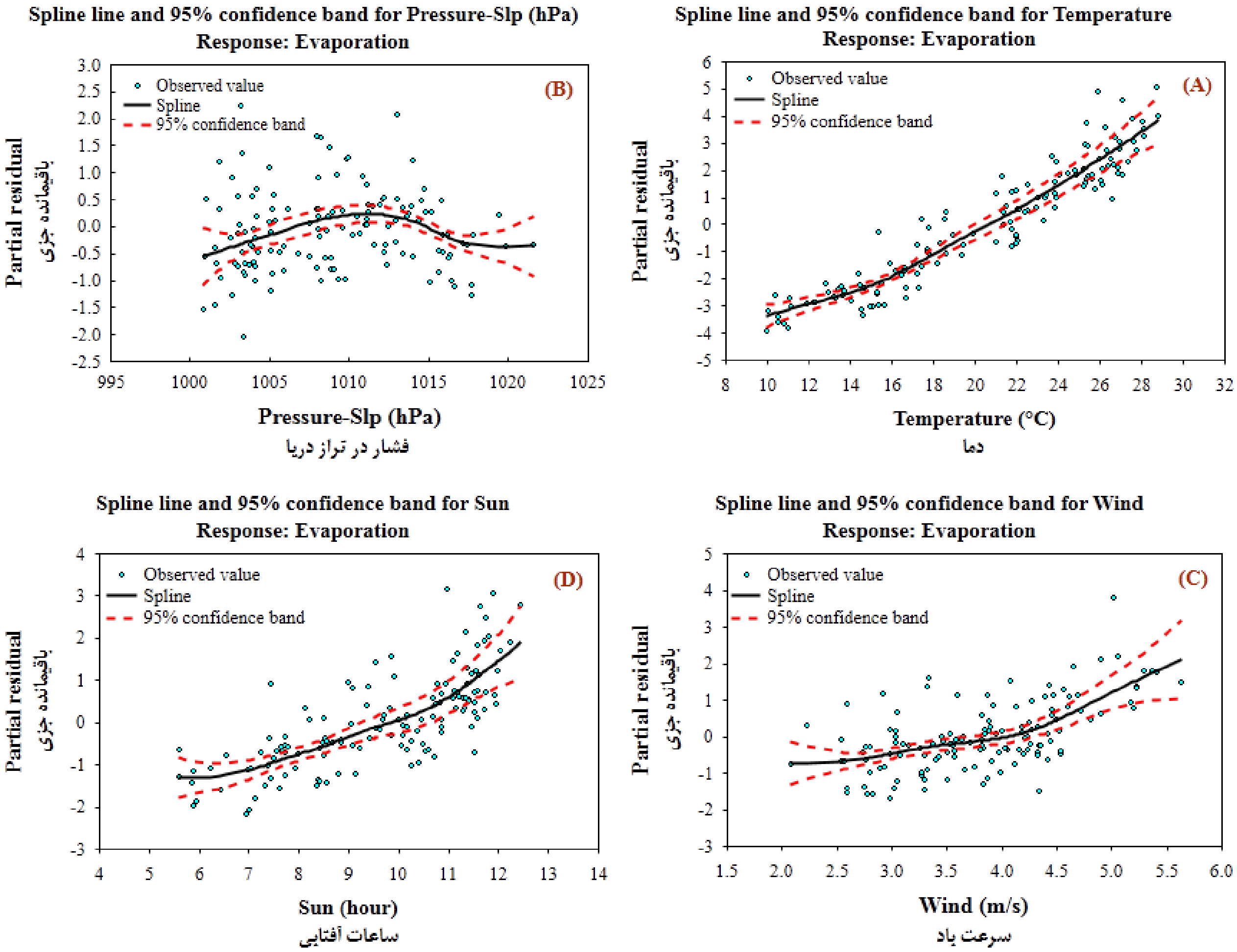
متغیر Variable		مدل ترکیبی Hybrid Model			مدل انفرادی Single Model		
	میانگین Mean	درجه آزادی Degree Freedom	P-value	پارامترهای مدل Parameter of Model	درجه آزادی Degree Freedom	P-value	پارامترهای مدل Parameter of Model
دمای هوا Temperature	20.33	4.01	0.00	0.38	4	0.00	0.57
نم‌نسبی Humid	41	4.2	0.15	0.012	4	0.00	-0.31
فشار هوا Pressure	1008.86	4	0.002	-0.0055	4	0.00	-0.59
سرعت باد Wind	3.8	4.01	0.034	0.61	3.99	0.19	2.99
ساعات آفتابی Sun	9.6	4.04	0.018	0.42	4	0.0019	1.58
تبخیر Evaporation	9				-		

نمودارهای مؤلفه‌های هموارساز اسپلاین مدل GAM برای آگاهی از چگونگی واکنش ترکیبی و انفرادی تبخیر پتانسیل در مقابل هر یک از متغیرهای هواشناختی ترسیم شد. این نمودارها به تفکیک متغیرهای معنادار به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ قابل‌مشاهده‌اند. چنانکه از نمودارهای ترکیبی پیداست (۱ -A)، تأثیر کلی دما بر تبخیر افزایشی است. اما مقدار واحد این اثر با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند. به‌عبارتی واکنش تبخیر در مقابل دماهای پایین‌تر، از شدت کمتری نسبت به دماهای بالاتر برخوردار است.

واکنش انفرادی تبخیر (۲ -A) در مقابل دمای هوا نیز مشابه واکنش ترکیبی آن است. به این ترتیب مشخص می‌شود که سایر متغیرهای هواشناختی از نقش چندان زیادی در روند تأثیر دمای هوا بر گرادیان تبخیر برخوردار نیستند. تأثیر کلی و ترکیبی تغییرات فشار هوا بر مقدار تبخیر به‌صورت تک‌نمایی و کاهنده است (۱-B). برحسب مقادیر پارامترهای مدل و شیب منحنی اسپلاین، فشار در قیاس با سایر متغیرهای موردمطالعه، کمترین نفوذ خالص را بر گرادیان تبخیر دارد. درعوض، اثر انفرادی این متغیر بر تبخیر، بسیار شدید و کاهنده و تاحدودی خطی است (۲-B). بنابراین عمده نفوذی که فشار هوا بر تبخیر در محیط نشان می‌دهد به سبب عملکرد متغیرهای دیگری است که در رابطه بین این دو متغیر دخالت می‌کنند. واکنش ترکیبی تبخیر در مقابل سرعت باد نیز افزایشی است، البته شدت این واکنش با افزایش سرعت باد از ۴ متر برثانیه شدیدتر می‌شود (۱-C). اگرچه واکنش انفرادی و غیرخطی تبخیر در مقابل سرعت باد معنادار نبود ولی گرایش این واکنش نشان از افزایش شیب آن نسبت به تغییرات سرعت باد دارد. ساعات آفتابی نیز دارای اثر خالص افزیشی بر مقدار تبخیر است (۱-D). البته شیب اثر انفرادی این متغیر نیز همانند سرعت باد بیش از اثر ترکیبی آن به حساب می‌آید (۲-D). این فرایند بیان می‌کند که افزایش ساعات آفتابی، افزایش تأثیر متغیرهای هواشناختی بر تبخیر را در پی دارد. به‌طورکلی، ارزیابی نمودارهای هموارساز ترکیبی نشان می‌دهد به‌جزء فشار هوا که دارای اثر افزیشی-کاهشی بر تبخیر است سایر متغیرها از یک نفوذ صرفاً افزایشی بر تبخیر برخوردارند که شدت این رابطه دستخوش تغییر شده است. این فرایند موجب‌شده تا یک مؤلفه غیرخطی در رابطه متغیرهای مستقل با تبخیر پدید آید.

از آنجا که نمودارهای هموارساز اسپلاین ترکیبی، شکل پاسخ تبخیر را در مقابل هریک از متغیرهای پیش‌بین با حذف اثر سایر متغیرها مشخص می‌کنند لذا در نظرگیری ترکیب این متغیرهای هواشناختی، اطلاعات دقیق‌تر و واقعی‌تری از رفتار تبخیر در مقابل تغییرات محیطی نشان می‌دهد. چراکه با برازش انفرادی تبخیر در مقابل این متغیرهای هواشناختی، نمی‌توان به چگونگی عملکرد تبخیر در مقابل تغییرات محیطی آگاهی یافت. چنانکه مقایسه واکنش‌های ترکیبی و انفرادی تبخیر در مقابل متغیرهای هواشناختی، ضمن مشخص‌کردن اثر خالص هرکدام از این متغیرها، بیان می‌کند که چرا واکنش تبخیر در مقابل یک واحد معین از تغییر متغیرهای هواشناختی در طی زمان‌ها و مکان‌های مختلف، متفاوت است.

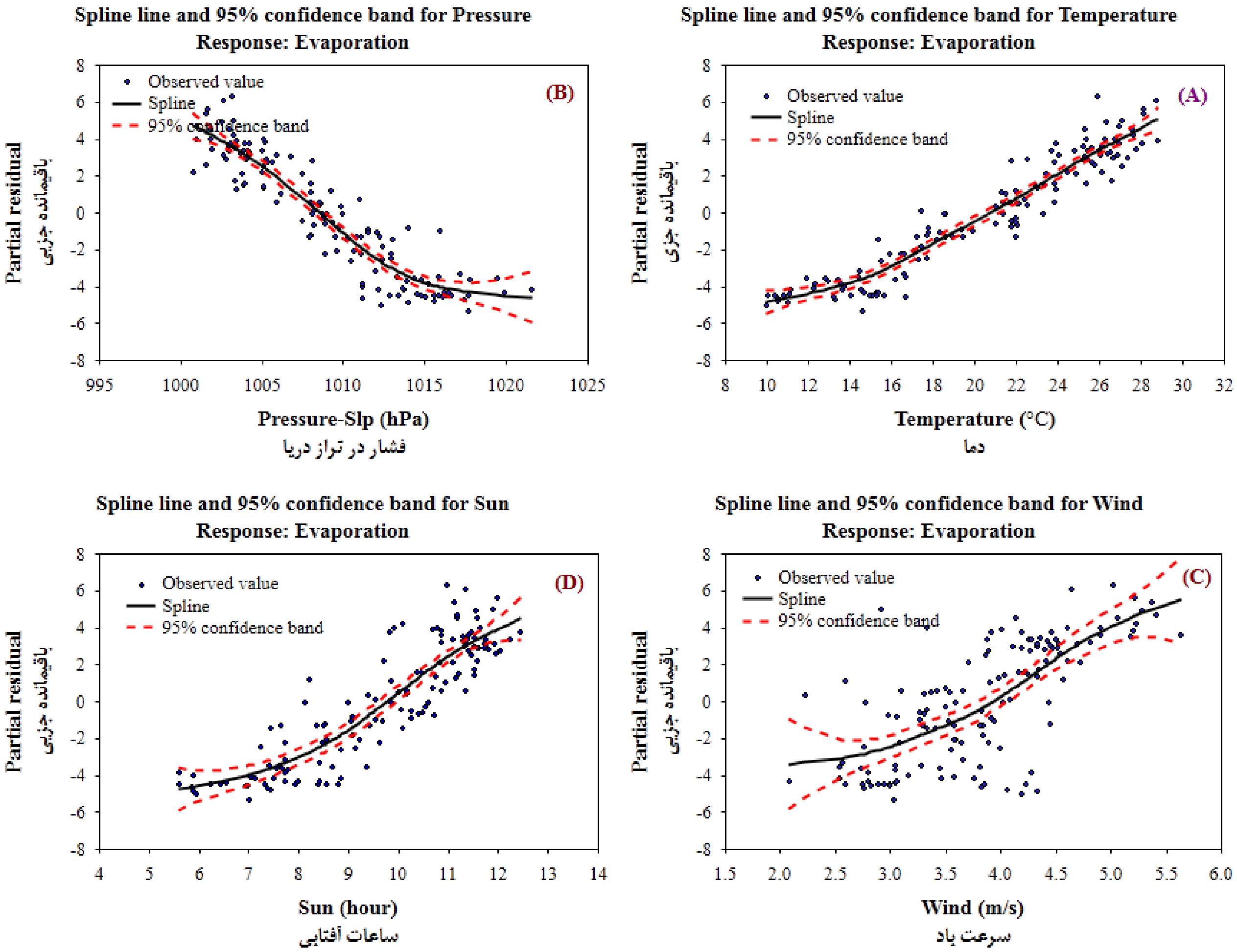
براساس نتایج مدل GLM، به‌جزء نم‌نسبی، مابقی متغیرها از اثر خطی معناداری بر تبخیر پتانسیل برخوردارند. بدین ترتیب، باوجود آنکه ضریب همبستگی درجه صفر نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل به مقدار ۰/۸۳- به‌دست آمد اما نتایج این مدل نیز همانند مدل GAM نشان می‌دهند که نم‌نسبی در ترکیب با سایر متغیرها، رابطه خطی معناداری با تبخیر پتانسیل ندارد. برای آگاهی از مقدار رابطه خطی واقعی نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل بدون دخالت سایر متغیرها، در یک ماتریس همانی، با کنترل اثرات دمای هوا، فشار هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی، مقدار همبستگی تفکیکی درجه ۴ و درجه ۱ نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل به مقدار ۰/۰۹۷- و ۰/۰۱۹۷ محاسبه شد.



شکل ۱– واکنش ترکیبی تبخیر به متغیرهای هواشناختی دمای هوا (A)، فشار تراز دریا (B)، سرعت باد (C)، ساعات آفتابی (D)
Figure 1-Hybrid response evaporation vs meteorology variable. Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

این مقادیر ضریب به‌عنوان رابطه خطی مستقیم و بدون واسطه نم‌نسبی با تبخیرپتانسیل به شمار می‌روند. بنابراین آشکار می‌شود که تأثیر نم‌نسبی بر تبخیر پتانسیل به‌طور بسیار شدیدی توسط سایر متغیرها به ویژه دمای هوا کنترل می‌شود. این دستاورد با نتایج مطالعه خورشیدوست و همکاران (۱۱) که در یک مدل ترکیبی با استفاده از معادلات ساختاری و همبستگی درجه صفر مشخص کردند که مجموع تأثیر غیرمستقیم متغیرها بر تبخیر بیش از اثر مستقیم آنها است هم‌خوانی دارد.

به‌طورکلی نتایج حاصل از این دو مدل، دلالت بر پاسخ خطی و غیرخطی تبخیر به متغیرهای هواشناختی مانند دمای هوا نم‌نسبی، فشار هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی دارد. چنانکه با افزایش دما، تبخیر نیز متعاقباً افزایش پیدا می‌کند اما شدت این افزایش روند یکسانی را نشان نمی‌دهد. زیرا دامنه تغییر عواملی مانند فشار بخار اشباع و میزان انرژی مورد نیاز که در مقدار تبخیر مؤثرند، از رابطه نمایی و غیرخطی با دمای هوا برخوردار است (۱۲). به طوری که هرچه دما بیشتر باشد به مقدار انرژی کمتری برای رخداد هر واحد تبخیر مورد نیاز است و از سوی دیگر، حساسیت فشار بخار اشباع نیز نسبت به تغییرات دما بیشتر می‌شود. به این صورت که مقدار تغییر فشار بخار اشباع نسبت به یک واحد تغییر در دمای هوای گرم بسیار بیشتر از همان واحد تغییر دما در هوای سردتر است. چنین فرایندهای موجب پدید آمدن مؤلفه‌ای غیرخطی از پاسخ تبخیر به تغییرات دما شده‌اند. از سویی، به سبب آنکه بیشینه گنجایش رطوبتی هوا وابسته به دما است بنابراین نم‌نسبی نیز علاوه بر بخار آب به دمای هوا نیز بستگی دارد. به طوری که با ثابت نگه داشتن بخار آب و تغییر همزمان دمای هوا، نم‌نسبی متحمل تغییر شدیدی خواهد شد (۱).



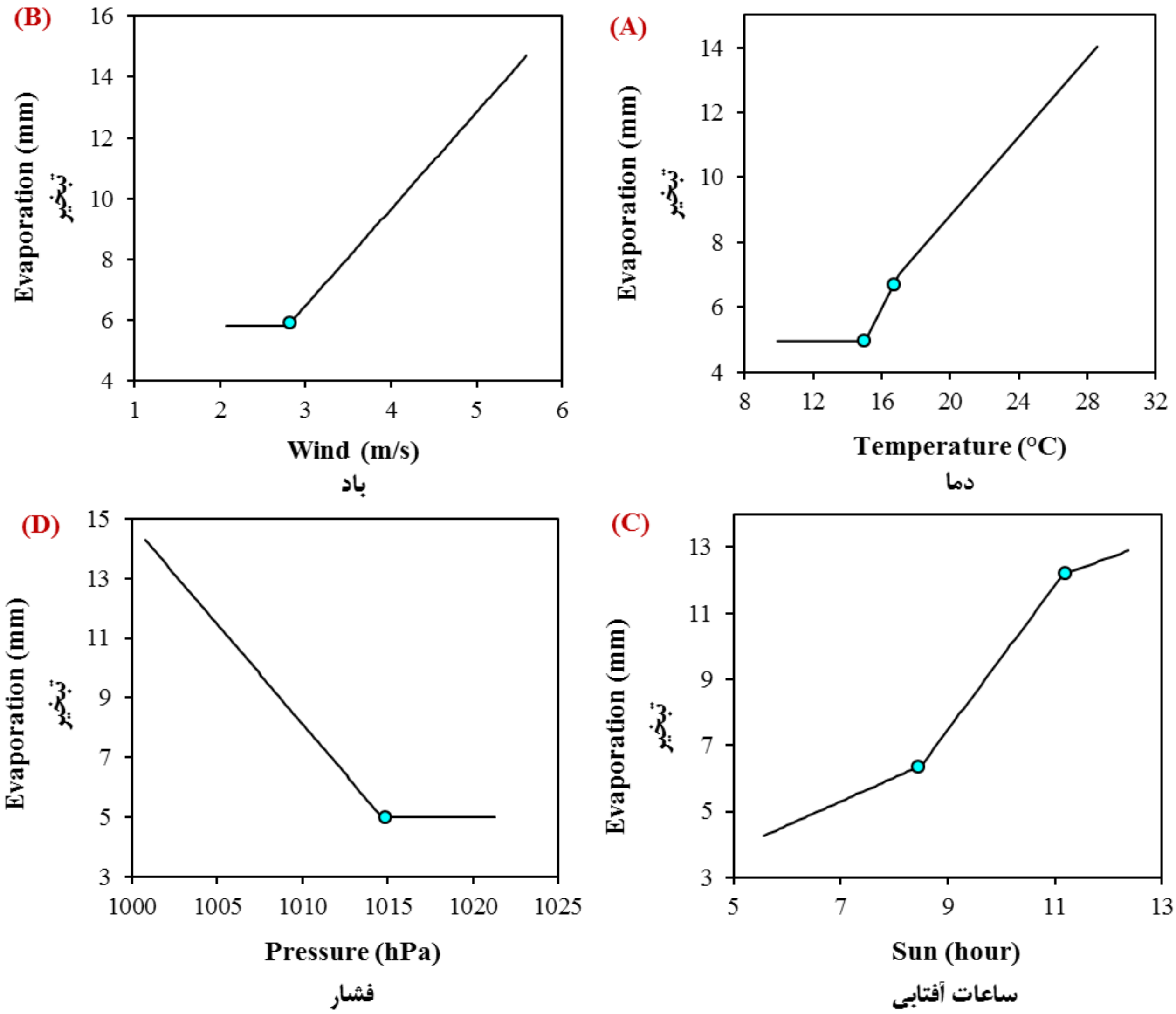
شکل ۲– واکنش انفرادی تبخیر به متغیرهای هواشناختی دمای هوا (A)، فشار تراز دریا (B)، سرعت باد (C)، ساعات آفتابی (D)

Figure 2- Single response evaporation vs meteorology variable. Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

جدول ٤- مقادیر همبستگی درجه صفر و تفکیکی متغیرهای هواشناختی با تبخیر

Table 4- Zero correlation and partial correlation of meteorological variables with evaporation

متغیر Variable	همبستگی درجه صفر Zero Correlation	همبستگی تفکیکی درجه ٤ Partial Correlation-4	همبستگی تفکیکی درجه ۱ با کنترل دمای هوا Partial Correlation Controlling for Temperature
دمای هوا ـ تبخیر Temperature-Evaporation	0.95	0.484	-
نم‌نسبی ـ تبخیر Humid-Evaporation	-0.83	-0.097	0.197
فشار هوا ـ تبخیر Pressure-Evaporation	-0.92	-0.318	-0.55
سرعت باد ـ تبخیر Wind-Evaporation	0.7	0.347	0.54
ساعات آفتابی ـ تبخیر Sun-Evaporation	0.88	0.32	0.24

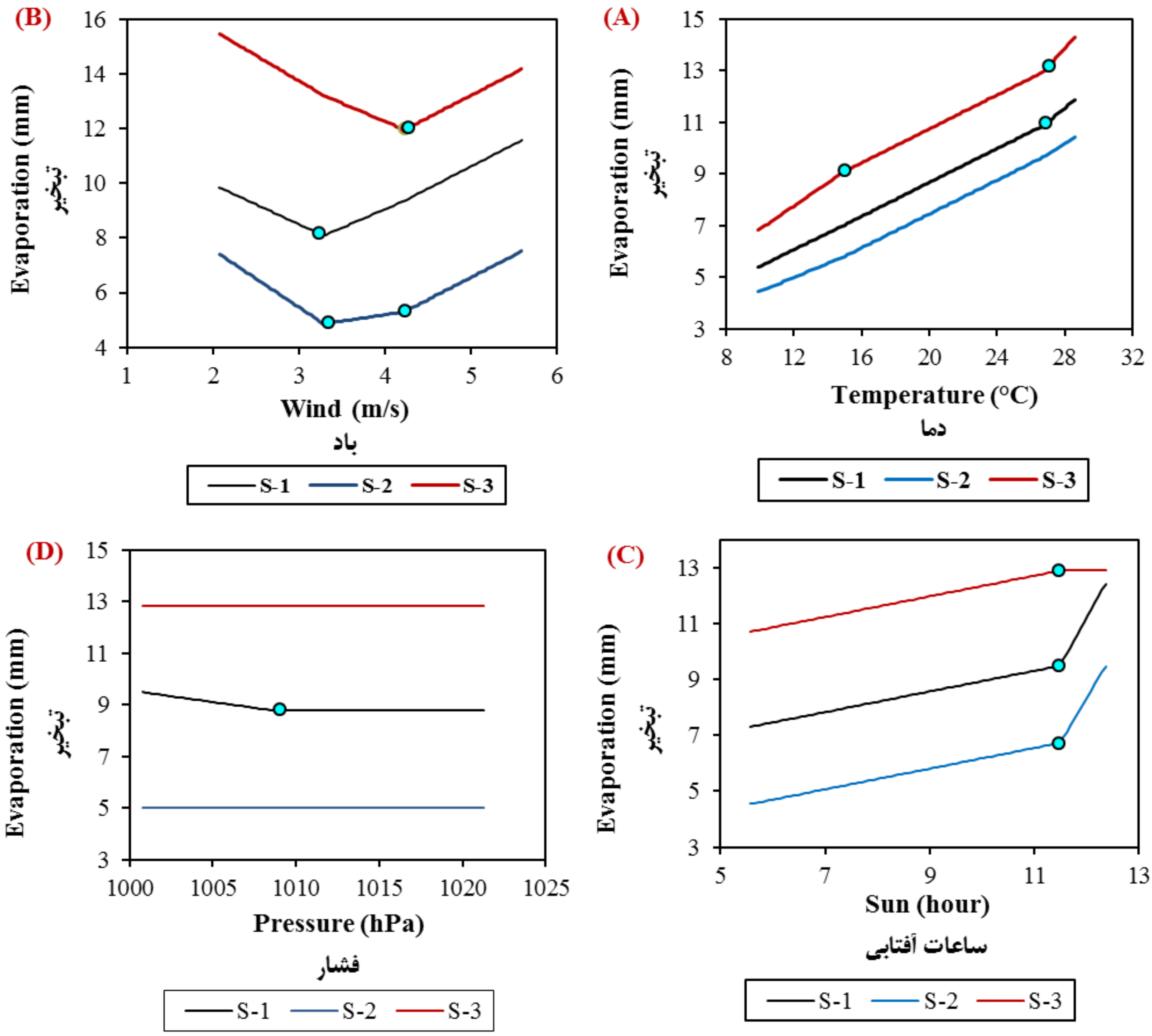


شکل ۳- نمودار گرادیان و گره‌های واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناختی، دما (A)، باد (B)، ساعات آفتابی (C) و فشار (D)

Figure 3- Gradian and response Knots plot evaporation response vs meteorology variable, Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

لیکن، تبخیر تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که فشار بخار هوا برابر با فشار بخار اشباع متناظر با دمای مایع شـود (۱۵)، بنـابراین در صـورتی کـه دمای هوا بیشتر از دمای مایع باشد، زمانی فرا خواهد رسید که به‌رغـم اشباع نبودن هوا یا کمبود بخـار آب بـرای اشـباع هـوا، عمـلاً تبخیـر متوقف می‌شود. از سویی اگرچه کمبود فشار بخـار اشـباع بـه عنـوان پارامتر مهمی در تشدید تبخیر به شمار می‌رود (۱۹) اما شدت و میزان تأثیر این متغیر وابسته به دمای هوا است. چنانکه در ایـن مطالعـه بـا کنترل دمای هوا، نقش نم‌نسبی در گرادیان تبخیر پتانسیل عملاً ناچیز شد (جدول ۴). بنابراین بـرخلاف مطالعـه شـی و همکـاران (۱۹) کـه بیشترین نقش را در کنترل تبخیـر در تبـت بـه نـم‌نسـبی اختصـاص داده‌اند، نتایج این مطالعه بـا رویکـرد خطـی و غیرخطـی، تفکیـک و کنترل متغیرهای هواشناختی نشان می‌دهد کـه در شهرسـتان تبریـز، نم‌نسبی در قیاس با سایر متغیرهای هواشناختی نظیر دمای هوا دارای چنین نقشی بااهمیتی در کنترل تبخیر نبود. چراکه در صورت حذف و کنترل تأثیر دمای هوا و سرعت باد، نم‌نسبی از نقـش چنـدانی بـرای کنترل تبخیر پتانسیل برخوردار نیست.

همـان طـور کـه مشـخص شـد واکـنش تبخیـر بـه متغیرهـای هواشناختی تنها منوط به یک سـطح نیسـت بلکـه واکـنش تبخیـر از گرادیان‌های متفاوتی در مقابل تغییرات این متغیرهـا برخـوردار اسـت. بنابراین در ادامه به‌منظور شناسایی گره‌های گرادیان واکـنش تبخیـر، ابتدا با کاربرد مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین، مدل تبخیر ایجاد و آنگاه با تعریف سه سناریوی آب و هوایی مبتنی بر داده‌های ایستگاه و استفاده از الگوریتم سیمپلکس به شناسایی گره‌های واکـنش تبخیـر در خلال این سناریوها پرداخته شد.



شکل ٤- نمودار گرادیان و گره‌های واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناختی با فرایند کنترل متغیرها، تحت سناریوهای متفاوت آب و هوایی، دما (A)، باد (B)، ساعات آفتابی (C) و فشار (D)

Figure 4- Gradian and response Knots plot evaporation response vs meteorology variable by controlling for meteorology variable based on different climatic scenarios. Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

در این سناریوها با ثابت نگه‌داشتن مقادیر متغیرها در سطح میانگین بلندمدت دوره تحت بررسی، واکنش تبخیر به تغییرات هریک از متغیرها سنجیده شد. گرادیان واکنش‌های انفرادی و بدون کنترل متغیرها، در شکل ۳ ارائه شده‌اند. در این خصوص دمای هوا و ساعات آفتابی در سه سطح و فشار هوا و سرعت باد در دو سطح، تبخیر را متحمل تغییر می‌کنند. این یافته نیز نشان از وجود مولفه‌ای غیر خطی در گرادیان واکنش تبخیر نسبت به تغییرات متغیرهای هواشناختی دارد. از سویی آرایش این نمودارها نشان می‌دهد که گرادیان تبخیر نسبت به دما، سرعت باد و فشار هوا، در گره اول بدون شیب و فاقد همبستگی معنادار است؛ بنابراین، سه متغیر یادشده در این بخش، عملکردی متفاوت نسبت به حالت کلی نشان می‌دهند. یعنی افزایش دما در گره اول، با کاهش سرعت باد و افزایش فشار همراه بوده و این سه متغیر در راستای خنثی‌سازی اثر همدیگر عمل می‌کنند. به عبارتی در این گره، رابطه دما با سرعت باد و فشار هوا به ترتیب معکوس و مستقیم است، در صورتی که در گره‌های بعدی، عملکرد این متغیرها به صورت هم‌افزا تغییر می‌کند. درنتیجه در خلال ماه‌های مختلف،

شدت و جهت اندرکنش متغیرهای هواشناختی متفاوت است.

واکنش تبخیر به تغییرات متغیرهای هواشناختی تحت سناریوهای S-1، S-2 و S-3، ضمن اینکه به‌درستی، اندرکنش این متغیرها را در ترسیم مقدار مطلق تبخیر، معین می‌کند به طور تلویحی به نقش هم‌افزایی این متغیرها در تعیین مقدار مطلق تبخیر نیز اشاره می‌کند (شکل ۴). به طوری که در دماهای یکسان، مقادیر تبخیر متفاوتی مشاهده می‌شود. همچنین کمترین فاصله بین

مقادیر مطلق تبخیر تحت این سه سناریو به دمای هوا اختصاص دارد که این نیز دلالت بر تأثیرپذیری کمتر دمای هوا نسبت به سایر متغیرها دارد. یعنی اثر هریک از متغیرهای هواشناختی بر مقدار تبخیر تا حد زیادی منوط به رابطه این متغیر با سایر متغیرهای هواشناختی بوده در صورتی که چنین موضوعی برای دما از وزن کمتری برخوردار است. واکنش تبخیر به تغییرات فشار با ثابت نگه‌داشتن اثر سایر متغیرها نشان از عدم تأثیر خالص نوسانات این متغیر بر گرادیان تبخیر دارد. گرادیان واکنش تبخیر به سرعت باد تحت هر سه سناریو نشان می‌دهد که متغیر واسطی در فرایند تأثیر سرعت باد بر تبخیر وجود دارد که در این مطالعه در نظرگرفته نشده است.

نتیجه‌گیری

تبخیر پتانسیل یکی از مهمترین پدیده‌های چرخه آب در طبیعت است که به‌عنوان شناسه نیاز آبی گیاه نیز محسوب می‌شود. این پدیده، پیامد اثر ترکیبی چندین متغیر هواشناختی بوده که این متغیرها دارای روابط مستقیم، غیرمستقیم و غیرخطی با هم هستند. چگونگی گرایش تبخیر بستگی به اندرکنش این متغیرها با هم و اثر ترکیبی آنها دارد. در نتیجه، تبخیر پتانسیل ماهیتی پیچیده دارد که عملکرد آن در هر ناحیه آب و هوای متفاوت از سایر نواحی است.

در این مطالعه با کاربرد مدل‌های غیرخطی GAM، مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین، مدل خطی GLM، همبستگی درجه صفر و همبستگی تفکیکی، واکنش و گرادیان تبخیر پتانسیل ماهانه شهر تبریز در مقابل متغیرهای هواشناختی شامل دما، فشار، نم‌نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی سنجیده شد. نتایج نشان دادند که ترکیب متغیرهای مؤثر در گرادیان تبخیر پتانسیل در هر دو مدل یکسان است. به این ترتیب که در دو مدل GLM و GAM، تنها نم‌نسبی در ترکیب با سایر متغیرها فاقد رابطه معناداری بود. به طوری که اضافه‌شدن متغیر یادشده به این دو مدل، هیچگونه تأثیری در افزایش ضریب تبیین مدل نهایی موجب نمی‌شود. همچنین نتایج حاصل از مؤلفه‌های هموارساز اسپلاین ترکیبی و انفرادی و ترکیب الگوریتم سیمپلکس با مدل تطبیقی مارس اسپلاین ضمن معین‌کردن وجود مولفه‌ای غیرخطی در واکنش تبخیر نسبت به تغییرات متغیرهای مورداستفاده نشان داد که شدت حساسیت و واکنش تبخیر پتانسیل در مقابل هر واحد تغییر در هریک از این متغیرها علاوه براینکه به مقدار مطلق آن متغیر بستگی دارد به چگونگی اندرکنش آن متغیر با سایر متغیرهای هواشناختی نیز وابسته است. به طوری که در نظرگرفتن ترکیب متغیرهای هواشناختی موجب کسب اطلاعات دقیق‌تری از چگونگی واکنش تبخیر پتانسیل نسبت به محیط، شد.

همچنین ترکیب الگوریتم سیمپلکس با مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین تحت سه سناریو آب و هوایی S-1، S-2 و S-3، وجود گره و گرادیان‌های متفاوت در پاسخ تبخیر به هر یک از متغیرهای هواشناختی را مشخص کرد. به‌عبارتی گرادیان واکنش تبخیر به یک متغیر خاص در چندین سطح طبقه‌بندی می‌شوند. در این خصوص، دمای هوا با کمترین تأثیرپذیری از سایر متغیرهای هواشناختی به‌عنوان متغیری شناسایی شد که از بیشترین تأثیر غیرخطی و بدون واسط بر تبخیر برخوردار است. درحالی‌که فشار هوا با کمترین نفوذ خالص بر گرادیان تبخیر به منزله متغیری شناسایی شد که در صورت ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها، نقشی در گرادیان غیرخطی تبخیر برعهده نخواهد داشت.

به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت پیچیده روابط بین متغیرهای هواشناختی، ضرورت دارد که برای کاهش عدم قطعیت در فرایند مدل‌سازی این پدیده‌ها از ترکیب چندین مدل خطی و غیرخطی بهره گرفته شود. زیرا به طور قطع نمی‌توان رابطه بین چندین متغیر را در دستگاهی مانند آب و هوا که ماهیتی پیچیده، آشوب‌مند و خودتنظیم دارد را در یک مدل خطی و یا غیر خطی که خطای محاسباتی آن تنها برروی یک نمونه تصادفی یا گزینشی از داده‌های دردسترس آزمون شده خلاصه کرد. بلکه لازم است چندین مدل با قابلیت مختلف با هم ترکیب شوند تا براین اساس ضمن ارائه مدلی با قابلیت اعتماد بیشتر، شناخت بهتری نیز از روابط بین متغیرها حاصل شود.

منابع

1- Aguado E., and Burt J.E. 2013. Understanding weather and climate. Pearson. 608.
2- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Fao.

3- Dehghani A.A., Piri M., Hesam M., and Dehghani N. 2012. Estimation of Daily Pan Evaporation By Using MLP,RBF and Recuurent Neural Networks. Journal of Water and Soil Conservation 17(2): 49-67. (In Persian with English abstract).

4- Guisan A., Edwards Jr T.C., and Hastie T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. Ecological Modelling 157(2-3): 89-100.

5- Gundalia Manoj J., and Dholakia Mrugen B. 2013. Dependence of evaporation on meteorological variables at daily time-scale and estimation of pan evaporation in Junagadh region. American Journal Eng Research 10(2): 354-362.

6- Hastie T., and Tibshirani R. 1986. Generalized Additive Models. Statistical Science 1(3): 297-310.

7- Hastie T., and Tibshirani R. 1987. Non-parametric logistic and proportional odds regression. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics) 36(3): 260-276.

8- Isazadeh M., ahmadzadeh h., and Ghorbani M.A. 2016. Assessment of Kernel Functions Performance in River Flow Estimation using Support Vector Machine. Journal of Water and Soil Conservation 23(3): 69-89. (In Persian with English abstract)

9- Jahanbakhsh S., Khorshiddoust A.M., Mirhashemi H., Khorrami H., and Tadayoni M. 2014. Trending Changes of the Reference Crop Water Requirement and its Associated Meteorological Variables in East Azerbaijan. Water and Soil 28(2): 296-306. (In Persian with English abstract)

10- Kay A., and Davies H. 2008. Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts. Journal of Hydrology 358(3-4): 221-239.

11- Khorshiddoust A.M., Jahanbakhsh Asl S., Mirhashemi H., and Farzin S. 2016. Modeling and Analysis of the Combined Effects of Meteorological Variables on Atmospheric Evaporative Potential Using Structural Equation (Case Study: Tabriz City). Water and Soil Science 25(4/2): 257-270. (In Persian with English abstract)

12- Lutgens F.K., and Tarbuck E.J. 2016. Atmosphere, The: An Introduction to Meteorology. 13 ed.: Pearson.

13- O'Neill R.t. 1971. Algorithm AS 47: function minimization using a simplex procedure. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics) 20(3): 338-345.

14- Rahimikhoob A., and Mahmoodi A. 2012. Estimating Actual Evapotranspiration in a Catchment Using Artificial Neural Networks with Minimum Climatic Data Case Study: Emame Representative Catchment. Iran-Water Resources Research 7(4): 51-61. (In Persian with English abstract)

15- Rakhecha P., and Singh V.P. 2009. Applied hydrometeorology. Springer Science & Business Media.

16- Remenieras G. 1984. Principles of Engineering Hydrology. Vol. 1r, Iran: Ministry of Power. 400.

17- Ren J., Li Q., Yu M., and Li H. 2012. Variation trends of meteorological variables and their impacts on potential evaporation in Hailar region. Water Science and Engineering 5(2): 137-144.

18- Shadmani M., and Marofi S. 2011. Comparison of Some Methods for Estimation of Daily Pan Evaporation: Case Study in Kerman Region. Journal of Water and Soil Science 15(55): 69-84. (In Persian with English abstract)

19- Shi H., Li T., and Wang G. 2017. Temporal and spatial variations of potential evaporation and the driving mechanism over Tibet during 1961–2001. Hydrological Sciences Journal 62(9): 1469-1482.

20- Valizadeh Kamran H. 2014. Estimation of Potential Evapotranspiration with Estefnz Method and GIS Techniques in Eastern Azerbaijan. Geography and Planning 18(49): 317-334. (In Persian with English abstract)

21- Van Bavel C. 1966. Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. Water Resources Research 2(3): 455-467.

22- Xu C.Y., and Singh V. 1998. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time‐scales and intercomparison of estimation methods. Hydrological Processes 12(3): 429-442.

23- Yan Z., Wang S., Ma D., Liu B., Lin H., and Li S. 2019. Meteorological Factors Affecting Pan Evaporation in the Haihe River Basin, China. Water 11(2): 317.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 5, Nov.-Dec. 2020, p. 1175-1188

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۹، ص. ۱۱۸۸-۱۱۷۵

Linear, Nonlinear and Hybrid Response of Potential Evaporation to Meteorological Variables (Case Study: Tabriz Synoptic Station)

H. Mirhashemi[1*]
Received: 30-09-2019
Accepted: 10-10-2020

Introduction: Potential evaporation is the result of the combined effects of several meteorological elements, including air temperature, relative humidity (or vapor pressure for saturation), wind speed, sunshine hours and air pressure. The amount of potential evaporation depends on how these variables interact in each climate region. Potential evaporation response of each of these variables depends on the importance that variable plays in the environment. For example, in windy places, the importance of wind speeds in the potential evaporation rate increases relative to places with calm air. By changing each of these meteorological elements, while the rest of the elements react to the given change, the overall effect of these changes and reactions is reflected in the amount of potential evaporation. It is therefore obvious that the potential evaporation response to meteorological variables due to spatial and time variations of these variables is of a complex nature.

Materials and Methods: For this study, monthly data of air temperature, air pressure at sea level, wind speed, relative humidity and sunshine hours were used as independent variables and monthly data of evaporation pan at Tabriz Synoptic Station as response or dependent variable. In this study, firstly, the nonlinear and linear relationship between meteorological elements and potential evaporation were identified through Generalized Additive Model (GAM), MARSplines Model, and Generalized Linear Model (GLM), respectively. In the next step, by applying the simplex algorithm on the MARSplines model, the evaporation response gradient levels were determined individually for the meteorological variables. Also, to understand the process of pure evaporation response to each of these variables under different climatic conditions, first three weather conditions based on Tabriz Synoptic Station data were defined in three scenarios as S-1, S-2 and S-3. Then, by controlling and maintaining the meteorological variables under these three scenarios and combining the simplex algorithm with the MARSplines Model, the net evaporation reaction curves for the meteorological variables changes were evaluated.

Results and Discussion: The computational results show that in all combinations, the computational error of the GAM model is less than the GLM model. Also considering the significant variables in each model, the combination of temperature, pressure, wind speed and sunshine are considered as the best subset of the effective variables in the distribution of potential evaporation in both models. On the one hand, relative humidity in these two linear and nonlinear models, in combination with other variables, does not show a significant relationship with potential evaporation. The results of the graphs of Splin smoothing components of the GAM model show that the overall effect of temperature on the evaporation is incremental. But the unit amount of this effect increases with increasing temperature. The individual evaporation reaction against air temperature is similar to its combined reaction. It is thus clear that other meteorological variables do not play a significant role in the influence of air temperature on the evaporation gradient. The overall and hybrid effect of air pressure variations on the amount of evaporation is singular and decreasing. Instead, the individual effect of this variable on evaporation is very intense, decreasing, and partly linear. Therefore, the major influence of air pressure on evaporation in the environment is due to the performance of other variables that interfere with the relationship between these two variables. The evaporation hybrid response to wind velocity was also incremental, although the single and nonlinear evaporation response to wind velocity was not significant, but its tendency was to increase its slope with respect to wind velocity changes. Sunny hours also have a net effect on the amount of evaporation. However, the slope of the solitary effect of this variable, like wind speed, is more than its combined effect. Based on the GLM model results, except for relative humidity, the other variables have a significant linear effect on the potential evaporation. Evaporation response to changes in meteorological variables under S-1, S-2 and S-3 scenarios, while accurately determining the interaction of these variables in plotting absolute evaporation, implicitly implying the synergistic role of these variables in determining absolute evaporation. The lowest distance between the absolute values of evaporation under these three scenarios is related to air

1- Assistant Professor in Climatology, Geography Sciences Department, Lorestan University, Khorammabad, Iran
(*- Corresponding Author Email: mirhashemi.h@lu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v34i5.82703

temperature, which implies less influence of air temperature than the other variables. That is, the effect of each of the meteorological variables on the amount of evaporation depends to a large extent on the relationship of this variable to other meteorological variables, if such a matter is less weighted for temperature.

Conclusion: The results of this study show that, except for air pressure, which has an increment-reducing effect on evaporation, other variables have only an incremental influence on evaporation and the intensity of this relationship has changed. This process has resulted in a nonlinear component in the relation of independent variables to evaporation. Since hybrid spline smoothing graphs determine evapotranspiration response to each of the predictor variables by eliminating the effect of other variables, therefore, consideration of the composition of these meteorological variables provides more accurate information on evaporation behavior against environmental changes. Through individually fitting evaporation against these meteorological elements, one cannot find how evaporation works against environmental changes. Comparing individual and combined evaporation responses to meteorological variables, while identifying the net effect of each of these variables, explains why evaporation responses within a given unit differ from changing meteorological variables over different times and locations.

Keywords: Evaporation, Hybrid model, Nonlinear, Scenario simplex algorithm, Smoothing component